Aus der chirurgischen Klinik der Universität Bern
Direktor: Prof. Dr. K. Lenggenhager

WASSERDAMPFGEHALT DER AUSATMUNGSLUFT

INAUGURAL-DISSERTATION

zur
Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität Bern

vorgelegt von

Hans Bürgi

von Aarberg (Bern)

ARNAUD DRUCK BERN 1957

Aus der chirurgischen Klinik der Universität Bern
Direktor: Prof. Dr. K. Lenggenhager

WASSERDAMPFGEHALT DER AUSATMUNGSLUFT

INAUGURAL-DISSERTATION

zur
Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität Bern

vorgelegt von

Hans Bürgi

von Aarberg (Bern)

ARNAUD DRUCK BERN 1957

Von der Medizinischen Fakultät auf Antrag des Herrn Prof. Dr. K. Lenggenhager zum Druck als Dissertation genehmigt.

Bern, den 8. Dezember 1956.

Der Dekan der Medizinischen Fakultät:

Prof. Dr. W. Wilbrandt

1. AUFGABE

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Ausatmungsluft.

Dabei soll eine neue Bestimmungsmethode auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht, die Fehlerquellen gefunden und nach Möglichkeit ausgeschaltet werden.

Weiter sind eine Reihe von Untersuchungen am Gesunden unter möglichst verschiedenen Bedingungen auszuführen und zu vergleichen, wie beispielsweise vor und nach dem Essen; im Durst und nach dem Trinken; abends, vor dem Schlafen, morgens nüchtern und morgens, nach dem Frühstück. Schliesslich soll auch der fiebernde Organismus in seiner Wasserdampfausscheidung geprüft werden.

Vor der Beschreibung des prinzipiellen Vorgehens und der genauen Ausführung schiebe ich einen Abschnitt ein, in dem die Ergebnisse der bisherigen Literatur sinngemäss zusammengestellt werden sollen.

2. ALLGEMEINES

Vorerst mag es den Leser vielleicht etwas befremden, dass jeweils nicht auch die Bestimmung des Wasserdampfes der in die Lungen eingeatmeten Zimmerluft gefordert werden wird. Da hier jedoch keine absoluten, sondern nur relative Werte gemessen werden sollen, ist das auch zulässig. - Aus diesem Grunde habe ich darauf verzichtet, auch noch den Feuchtigkeitsgehalt der Inspirationsluft zu messen.

Dass unter verschiedenen Bedingungen sich auch die Wasserausscheidung durch die Lungen ändert, wurde bei allen Autoren der gesichteten Literatur bestätigt gefunden. Ja, JACQUOT und MAYER [1] möchten die Wasserabgabe von der Lunge sogar mit der Schweissekretion der Haut in Parallele bringen.

Bei gesunden Menschen sieht VIALE [2], wie schon die vertiefte und verlangsamte Atmung eine Steigerung der Wasserausscheidung durch die Alveolarluft mit sich bringt. Den gleichen Schluss zieht CHRISTIE [3] bei der Auswertung seiner Versuche. Allerdings finden JACQUOT und MAYER [4] diese Ergebnisse in ihren Versuchen nicht bestätigt. Sie bestreiten die Abhängigkeit der Wasserdampfausscheidung vom Atemvolumen. - Wie sehr der Feuchtigkeitsgehalt der Ausatmungsluft unter verschiedenen Bedingungen wechselt, beschreibt auch CZIKE [5] auf Grund seiner Bestimmungen am Gesunden. So sieht er, wie bei Normalkost die Feuchtigkeitsabgabe durch Ausatmung nach der Nahrungsaufnahme grösser, bei Trockenkost

dagegen geringer ist (Steigerung des Wasserverbrauches durch oxydat. und red. Prozesse). Dagegen will er nach peroraler Wasseraufnahme bei gesunden Nieren keinen Einfluss auf die Feuchtigkeitsabgabe gefunden haben. Er schliesst daraus, dass die Wasserabgabe durch die Atmungsluft mehr oder weniger dem Wasserhaushalt dient. - Auch BOTTARI [6] findet nach der Hauptmahlzeit erhöhte Werte in der Ausatmungsluft. Er beschreibt, dass sich an Gesunden der Wassergehalt der Ausatmungsluft den Bedürfnissen des Körpers anpasst. Immerhin kann er eine obere Grenze des normalen feststellen: der Wassergehalt des einzelnen Exspirationsstosses schwankt zwischen 0,016 g und $0,021_3$ g. - Der weiter oben zitierte CHRISTIE [3] stellt fest, dass eine Aenderung der Umgebungstemperatur zu einer Aenderung der Wasserdampfspannung der Alveolarluft führt. Der Verfasser bezieht das auf eine Aenderung der Lungentemperatur. - Schliesslich seien noch die Untersuchungen von SCHMITT-NIELSEN [7] erwähnt: sie vergleichen die Wasserausscheidung von Laborratten mit derjenigen von Wüstennagetieren, bei welchen sie eine verminderte Wasserabgabe finden. Diese verminderte Abgabe ist für den Wasserhaushalt dieser Tiere von erheblicher Bedeutung. - MADON und ROWINSKI [8] finden beim Säugling kleinere ausgeschiedene Wassermengen durch die Lungen als durch die Haut.

Veränderungen des Lungenzustandes bedingen Veränderungen des Feuchtigkeitsgehaltes der ausgeatmeten Luft. Aus den entsprechenden Veröffentlichungen von CZIKE [5][9], gebe ich folgende Ergebnisse wieder: bei Emphysem und Stauungslunge ist er geringer, bei Nierenkranken ohne Wasserhaushaltstörungen normal, bei Hypertonie auf Grund von Arteriosklerose mit Dekompensationserscheinungen herabgesetzt; Aderlass bewirkt in diesem Falle Steigerung (Besserung der Lungenventilation). Bei Diabetes insipidus ist die Wasserdampftension der Ausatmungsluft immer gesättigt. - Weiter findet er auch im Fieber erhöhte Werte.

Die Streitfrage, wo nun eigentlich die Wasserdampfsättigung der Atemluft stattfinden soll, sei hier etwas näher untersucht. - PERWITZSCHKY [10] findet bei Nasen- und Mundatmung, sowie auch bei Tracheotomierten unter gleichen Bedingungen gleiche Werte und schliesst daraus, dass diese Sättigung in den Alveolen zustande kommt. - In der Tatsache, dass bei tiefer Atmung die exspirierte Luft wasserhaltiger als bei overflächlicher ist, sieht BOTTARI [6] einen weiteren Beweis dieser Annahme. Er bezieht das auf die Ausstossung eines grösseren Anteiles der mit Wasserdampf gesättigten Reserveluft, woraus weiter zu schliessen ist, dass ein grosser Teil des exspirierten Wassers von der Alveolarwandung abgegeben wird. - LEVI [11] beobachtet, dass zwischen Wasserdampfspannung in der Inspirationsluft und der durch die Lungen abgegebenen Wassermenge eine relative Beziehung besteht. Da nun nach den Untersuchungen von GALEOTTI [12] und seiner Schule die Ausatmungsluft völlig mit Wasserdampf gesättigt ist, folgt hieraus, dass die Lungen die Wasserabgabe selbst regeln und zwar indem sie die

Schwankungen der Feuchtigkeit der Einatmungsluft kompensieren. Dieser Selbststeuerungsvorgang müsse betrachtet werden entweder als ein echter Sekretionsprozess oder als durch Veränderung des Vasomotorensystems bedingt. - SWINDLE [13] beobachtet einen Lappen einer Hundelunge, der künstlich ventiliert und von einem zweiten Hund vermittels Gefässkommunikation durchblutet wird. Normalerweise tritt Flüssigkeit bei Exspiration aus den gewundenen Lungenkapillaren aus und wird grösstenteils während der Inspiration wieder aufgenommen. Der Rest geht in die Atemluft, die Lymphwege und in die Lungenvenen über.

Dagegen ist FENICIA [14] anderer Ansicht. Wenn die Abgabe von Wasser an die Atemluft, wie gemeinhin angenommen, in den Lungenalveolen durch Sättigung mit der Dampfspannung aus dem Alveolenblut stattfindet, wäre zu erwarten, dass sich der Wassergehalt des Blutes beim Durchgang durch die Lungen vermindert. - Die diesbezüglichen Versuche werden an Hunden ausgeführt. In drei gleichzeitig aus dem rechten Ventrikel, aus der Vene eines kollabierten und der Vene eines tätigen Lungenlappens entnommenen Blutproben wird in der einen Versuchsgruppe der Wassergehalt des Plasmas, in der anderen Reihe der Wassergehalt des Gesamtblutes durch Wägung bestimmt. Dabei kann in der grossen Mehrzahl der Fälle nicht die geringste Wasserverarmung des Alveolarblutes nachgewiesen werden. Daraus schliesst der Verfasser, dass sich die Atemluft bereits vor dem Eintritt in die Alveolen bei der Passage der vorgeschalteten Luftwege mit Wasserdampf gesättigt haben muss, wie das übrigens auf Grund anderer Ueberlegungen auch von MAGNE [15] behauptet wird. Nur bleibt freilich zu bedenken, ob es wirklich möglich war, derartige Differenzen exakt zu erfassen.

Am Schluss dieses Kapitels sollen noch andere Methoden zur Bestimmung der Wasserausscheidung durch die Lungen wenigstens erwähnt werden. - Die bisher geübten Methoden lassen vier verschiedene Prinzipien erkennen:

1. a) Der Wasserdampf wird durch Absorption an Chlorkalk aus der ausgeatmeten Luft gewonnen. Entweder wird diese mit Hilfe eines in die Atemwege eingeführten Gummiröhrchens abgesaugt (PERWITZSCHKY [10]), oder sie wird in ein U-Röhrchen mit wasserfreiem $CaCl_2$ expiriert (CZIKE [5]). Schliesslich kann sie auch durch ein Absorptionsgefäss in eine trockene Gasuhr geblasen werden (BOTTAZZI [6]). Die Bestimmung der absorbierten Wassermenge erfolgt dann durch Wägung der Gewichtszunahme der Absorptionsgefässe vor und nach dem Versuch. Da auch die inspirierte Wasserdampf enthielt, muss dieser selbstverständlich vorgängig ermittelt werden. Erst aus der Differenz lässt sich die Wasserdampfausscheidung durch die Lungen bestimmen.

b) JACQUOT und MAYER [4] schlagen vor, die Ausatmungsluft, die bei 36° C gehalten wird um Kondensation von Wasserdampf zu vermeiden, in W-förmigen

Röhren durch Dewar'sche Gefässe mit flüssiger Luft zu leiten, in welchen aller Wasserdampf kondensiert wird, ebenso wie die CO_2 der Exspirationsluft in Form von Schnee. Bei Zimmertemperatur verflüchtigt sich nach Beendigung des Versuchs die CO_2 sehr rasch, das Wasser bleibt in Tröpfchenform zurück und wird durch Wägung bestimmt. - Das Volumen der Exspirationsluft wird mit einem Spirometer (Tissot) gemessen, die Frequenz der Atmung mit einer Marey'schen Kapsel.

2. Der Gasstrom passiert bei JONES [18] eine an den Enden mit Anschlüssen versehene Röhre, die waagrecht in einem Wasserbad von der gewünschten Temperatur liegt. Durch zwei Oeffnungen auf der oberen Seite werden mittels Gummistopfen 2 Thermometer in die Röhre eingesetzt. Der Hg-Behälter des einen Thermometers bleibt trocken, der des anderen Thermometers wird feucht gehalten durch etwas Stoff, der diesen Behälter umgibt und gleichzeitig in eine kleine wassergefüllte Ausbuchtung der diesem Thermometer gegenüberliegenden Stelle der Röhrenwandung hineinragt. Die reaktive Feuchtigkeit ergibt sich aus der auftretenden Temperaturdifferenz der beiden Thermometer und kann in den bekannten Tabellen abgelesen werden.

3. ASCHOFF [19] misst fortlaufend die Konzentration von Wasserstoff in der Ausatmungsluft mit Hilfe von Hitzdrahtdüsen. Bei der Messung wird das zu untersuchende Gas mit Frischluft verglichen; es sind also 2 Messkapillaren vorhanden.

4. Schliesslich bleibt noch die rein theoretische Berechnung des Wasserdampfes in der Ausatmungsluft, wie das von LOEWY [20] im Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden von Abderhalden beschrieben wird. - Zur Ausführung dieser Rechnung ist die Kenntnis des Gasstoffwechsels, d. h. des O_2-Verbrauchs und der CO_2-Ausscheidung erforderlich. Man geht dazu von der Menge der umgesetzten Nährstoffe aus. - Die Aufgabe ist dann zu berechnen, welchem O_2-Verbrauch und welcher CO_2-Bildung die Summe der im Körper umgesetzten Stoffe entspricht. Dazu braucht man einige Konstanten, die von ZUNTZ, LOEWY und CASPARI [21] berechnet wurden. Die Kenntnis dieser Werte benützt man zur Berechnung der Grösse der 24-stündigen Lungenventilation. Daraus ergibt sich der Tagesverbrauch von O_2 und die Lungen (-Luft)-ventilation pro Tag. Bei 34° C in der Lunge enthält die Luft bei Sättigung 35 mg Wasser pro Liter (LOEWY und GERHARTZ [22]). Aber auch die Einatmungsluft enthält Wasserdampf. Dieser wird mit Hygrometern bestimmt. - Der Körper gab also pro Liter Ventilation an Wasser ab: 35 mg minus mg Wasserdampf der eingeatmeten Luft. Das Gewicht des eingeatmeten O_2 ist aber nicht gleich dem Gewicht der ausgeschiedenen CO_2. Man errechnet also die Tagesdifferenz, subtrahiert diesen Wert von der pro Tag abgegebenen Wassermenge und erhält so das pro Tag ausgeschiedene Wasser.

Ausserdem wird noch die Verwendung von Respirationskammern zur Bestimmung des Wasserdampfgehaltes vorgeschlagen (ROLLY [23]; BENEDICT und TALBOT [24]). Die Fehlermöglichkeiten sind jedoch so mannigfaltig, dass hier auf eine genauere Schilderung verzichtet werden kann.

Es seien nur die Fehlerquellen erwähnt:

a) die Grössenverhältnisse des Kastens
b) die Ventilationsstärke
c) die Pausen in der Versuchsdauer
d) die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in Zimmer und Kasten
e) Absorption des Wassers durch die Wäsche

(ABDERHALDEN [20])

3. PRINZIP DER NEUEN METHODE

Die Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Ausatmungsluft zerfällt in 2 Versuche: in den Vorversuch zur Bestimmung der Temperatur der ausgeatmeten Luft und in den eigentlichen Hauptversuch.

Die Temperatur muss vorerst ermittelt werden, damit im Hauptversuch die Bestimmung der Wasserdampfspannung unter den gleichen Bedingungen erfolgen kann, wie sie in den Alveolen der Lunge gegeben sein mögen. - Die ausgeatmete Luft wird in eine Schüttelbirne, welche mit einem Manometer in Verbindung ist und in einem Wasserbad von vorerst ca. 37° C liegt, eingeschlossen. Diese eingeschlossene Luft wird nun mit der Zeit die Temperatur des die Birne umspülenden Wassers des Bades annehmen und sich je nachdem, ob sie wärmer oder kälter war als das Wasserbad, abkühlen, resp. erwärmen. Abkühlung oder Erwärmung lassen sich als Kontraktion oder Expansion des eingeschlossenen Luftvolumens leicht am Manometer verfolgen. Die Temperatur des Wasserbades wird nun so lange variiert (erhöht oder vermindert), bis sich im Manometer wieder die Null-Lage eingestellt hat. In diesem Falle hat sich ja das eingeschlossene Luftvolumen nicht verändert, die Temperatur des Wassers entspricht also genau derjenigen der Ausatmungsluft und kann mit einem Thermometer gemessen werden. - Es ist klar, dass auf dem Wege von den Alveolen der Lunge bis zur Glasbirne die ausgeatmete Luft einen Temperaturverlust erleidet (LILJESTRAND und SAHLSTEDT [16]), der bei unseren Bestimmungen nicht berücksichtigt werden kann.

Im Hauptversuch wird die Glasbirne, deren Volumen wir genau kennen, mit konzentrierter Schwefelsäure beschickt und in das Wasserbad, das die vorgängig ermittelte Temperatur der Ausatmungsluft aufweist, gelegt. Wieder wird ausgeatmete

Luft in die Birne eingeschlossen. Durch kräftiges Schütteln erreichen wir nun, dass die miteingeschlossene Schwefelsäure der Luft ihren Wasserdampf entziehen kann, woraus ein Volumenverlust resultiert. Dieser kann wieder mit dem Manometer gemessen werden und ist ein Mass für den Wasserdampfgehalt der ausgeatmeten Luft.

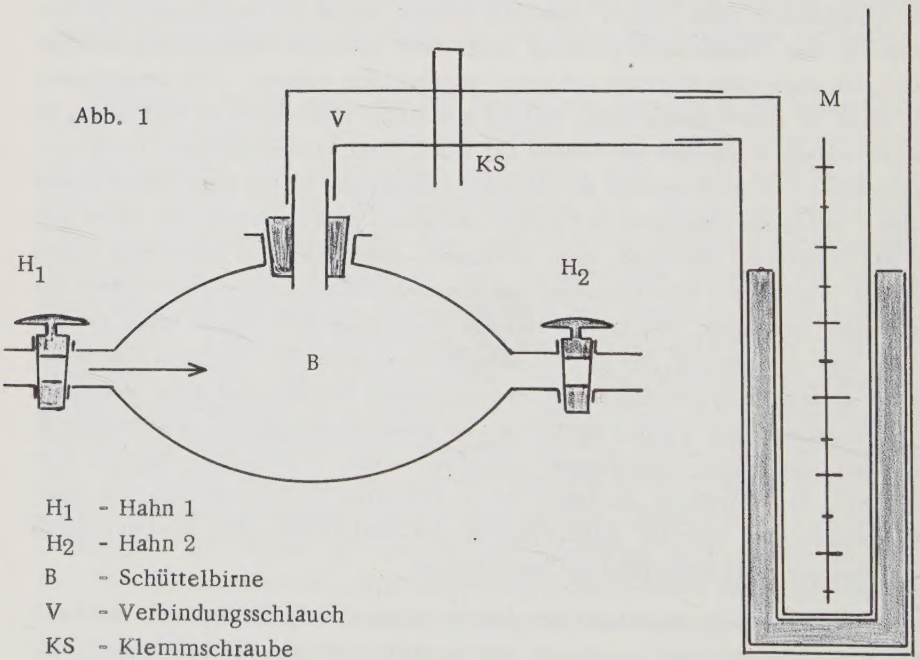
Es galt nun vorerst, in einer Reihe von Testversuchen, die unter 4a) und 4b) in der Ausführung vorgeschlagenen Zeiten und die notwendige Schwefelsäure experimentell zu ermitteln. Einige dieser Versuche werden unter 4c) beschrieben werden.

4. AUSFUEHRUNG

a) BESTIMMUNG DER TEMPERATUR DER AUSATMUNGSLUFT

Die in Abb. 1 dargestellte Schüttelbirne von genau 100 ccm Inhalt wird in ein Bad von ca. 37° C so eingelegt, dass sie allseitig umspült wird. Nur die an beiden Enden des Glasrohres angesteckten Gummischläuche ragen über die Wasseroberfläche hinaus und ermöglichen dadurch die ungehinderte Passage der durch das

Abb. 1



H_1 - Hahn 1
H_2 - Hahn 2
B - Schüttelbirne
V - Verbindungsschlauch
KS - Klemmschraube
M - Manometer

System zu blasenden Ausatmungsluft. Durch einen Glasrohransatz und anschliessenden Verbindungsschlauch, der mit einer Klemmschraube versehen wird, ist die Glasbirne an ein Manometer angeschlossen. - Bei offener Verbindung vom Manometer zur Schüttelbirne können sich, bei geöffneten Hähnen 1 und 2, die beiden Wassersäulen des Manometers auf gleiche Höhe einstellen. Nun wird mit der Klemmschraube der Anschluss an das Manometer unterbrochen. Die Versuchsperson blast jetzt, im Anschluss an eine normale Inspiration, ihre Ausatmungsluft durch den Schlauch bei Hahn 1, bei geöffnetem Hahn 2, und durch die Birne. Gegen das Ende dieser Exspiration wird Hahn 2 von der Versuchsperson geschlossen. Sie darf jetzt, bis nach 1 sec. auch Hahn 1 geschlossen wird, nicht mehr atmen, um in der Birne weder einen Unter- noch Ueberdruck zu erzeugen. Am besten behält sie den geöffneten Mund, bei unterbrochener Atmung, am Gummischlauch, bis Hahn 1 zugedreht ist. - Das richtige Blasen der Ausatmungsluft muss in ein paar Blindversuchen gut geübt werden, denn es liegt auf der Hand, dass sich schon hier grobe Fehler einschleichen können. - Dass, um den Druckausgleich sicherzustellen, zwischen dem Verschluss von Hahn 1 und 2 1 sec. gewartet werden muss, kann experimentell nachgewiesen werden. - Die Luft in der Schüttelbirne ist nach SCHOEDEL und WOLF [17] Alveolarluft, da bereits nach 600 ccm alveoläre Exspirationsluft und nicht ein Gemisch von Totraumluft und Alveolarluft erscheint. - Die in der Schüttelbirne eingeschlossene Ausatmungsluft nimmt in der Zeit von ca. 2 1/2 Minuten die Temperatur des Wasserbades an. War sie wärmer als das Bad, dann kühlt sie sich ab und zieht sich dabei zusammen; war sie kälter, dann hat sie sich als Folge ihrer Erwärmung ausgedehnt. Wird also die Klemmschraube geöffnet, dann lassen sich Kontraktion oder Expansion leicht am Manometer feststellen. - Um auch hier eine mögliche Fehlerquelle, nämlich den Niederschlag des Wasserdampfes der Ausatmungsluft als Wassertropfen an den Glaswänden der Birne und den damit verbundenen Volumenverlust auszuschliessen, wurden vor Beginn des Versuches einige Wassertropfen in die Birne eingeschlossen. - Die Temperatur des Wasserbades muss nun so geändert werden, dass sie den gleichen Wert wie die der Ausatmungsluft annimmt. Das ist dann der Fall, wenn das Manometer keinen Ausschlag mehr zeigt.

Die Temperatur des Wasserbades, die jetzt genau gleich ist wie die der Ausatmungsluft, kann, wenn ein Kontrollversuch keine Abweichung mehr gezeigt hat, mit einem Thermometer gemessen werden.

Rekapitulation der möglichen Fehlerquellen:

1. Ueberdruck oder Sog in der Glasbirne (falsches Einblasen)
2. Hahn 1 wurde sofort nach Hahn 2 geschlossen; d. h. der Druck hat sich nicht ausgleichen können.
3. Niederschlag des Wasserdampfes als Wassertropfen an den Glaswänden des Systems (ausgetrocknete Birne)

4. Die Ausatmungsluft hat noch nicht die Temperatur des Wasserbades angenommen (ca. 2 1/2 Min. warten).

b) BESTIMMUNG DES WASSERDAMPFGEHALTES DER AUSATMUNGSLUFT

Die gleiche Schüttelbirne (Abb. 1) wird peinlich genau ausgetrocknet und dann mit 10 ccm konz. Schwefelsäure (95-97 %) beschickt. Hierauf wird sie in das Wasserbad, welches jetzt genau die Temperatur der Ausatmungsluft hat, eingetaucht und dort liegen gelassen, bis sich die Temperatur der Schüttelbirne und der Schwefelsäure einerseits und des Wasserbades andererseits, ausgeglichen hat. Das dauert ca. 3 Minuten und kann, bei geschlossenem System, bequem am Manometer verfolgt werden. Daraus wird durch Oeffnen eines Hahns (1 oder 2) das Manometer in die Null-Lage einreguliert und dann der Verbindungsschlauch mit der Klemmschraube zugeklemmt.

Bei offenen Hähnen 1 und 2 bläst nun die Versuchsperson, genau gleich wie unter a) beschrieben, durch das System. Sind die 90 ccm Ausatmungsluft (100 ccm Inhalt der Birne minus 10 ccm Schwefelsäure) in der Glasbirne eingeschlossen, dann wird diese 40 sec lang kräftig geschüttelt, wobei die Schwefelsäure der ausgeatmeten Luft ihren Wasserdampf entzieht. Die Birne wird nun bis zum neuen Temperaturausgleich 1 Minute im Wasserbad liegen gelassen. - Jetzt wird die Klemmschraube kurz geöffnet und der Volumenverlust des Wasserdampfes am Manometer in mm/H_2O abgelesen.

Mögliche Fehlerquellen:

1. Das Wasserbad kühlt sich fortlaufend etwas ab. Daher sind ständige Temperaturkontrollen während der Versuchsdauer notwendig.
2. An der Glaswand der Birne sind nach der Reinigung noch Wasserreste zurückgeblieben. Deshalb muss sie jeweils vor Versuchsbeginn mit konz. Schwefelsäure gut gespült werden.
3. Die Temperaturen haben sich noch nicht ausgeglichen.
4. Alle Ablesungen am Manometer bei zugeklemmter Klemmschraube, da sie während des Versuchs auch ein ganz kleines Volumen Luft im Verbindungsschlauch verdrängt hat (3,0 mm/H_2O)

c) TESTVERSUCHE

Zunächst muss experimentell die Genauigkeit der oben beschriebenen Methode geprüft werden. Dabei galt es auch, die bei der Ausführung des Vor- und Hauptversuchs beschriebenen Zeiten zu ermitteln.

Die Abb. 2 illustriert, wie das z.B. für die unter a) bei der Bestimmung der Temperatur der ausgeatmeten Luft geforderten 2 1/2 Minuten für den Ausgleich der

Temperatur von 16,8° C auf. Die Ausatmungsluft wurde in die Glasbirne eingeschlossen und hierauf das Manometer gleich eingeschaltet. Alle 15 sec wurden die Werte im Manometer in mm/H_2O abgelesen, bis sich ein konstantes Gleichgewicht eingestellt hatte. Das war nach 150 sec der Fall.

Nachdem einmal die unter a) und b) beschriebenen Fehlerquellen gefunden und die Möglichkeit ihrer Vermeidung festgestellt war, wurden einige Resultate ermittelt, um die Streuung der Methode kennenzulernen. Es wurde dabei so vorgegangen, dass, bei Kenntnis der Temperatur der Ausatmungsluft, jeweilen dreimal nacheinander der Wassergehalt dieser Luft bestimmt wurde. Daraus wurden ein Mittelwert, die Abweichung von diesem Mittelwert, die mittlere Abweichung in mm/H_2O und in % und die für jede Serie maximale Abweichung vom Mittelwert in % errechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt. - Daraus ist ersichtlich, dass die vorgelegte neue Methode eine Streuung ihrer Resultate von 2,3 % zeigt.

Tabelle 1

Auswertung der Testversuche: Mittelwerte, Abweichungen von diesen Mittelwerten, mittlere Abweichungen in mm/H_2O und in %, maximale Abweichung vom Mittelwert in %

Versuchsperson: 25 j

Zi-temp in °C	Atem-temp. in °C	H_2O-Dpf. in mm/H_2O	Mittel-wert in mm/H_2O	Abw. v. MW in mm	mittlere Abw. in mm/H_2O	in %	max. Abw. in %
17,0	34,5	39/38/38	38	1/0/0	0,3	0,7	2,7
18,2	35,0	44/43/45	44	0/1/1	0,7	1,6	2,5
21,0	35,0	55/57/53	55	0/2/2	1,3	2,3	3,6
18,0	35,0	67/61/63	64	3/3/1	2,3	3,6	4,8
18,2	35,0	68/62/65	65	3/3/0	2,0	3,0	4,8
19,0	35,0	79/82/82	81	2/2/1	1,3	1,7	2,5
19,0	34,0	79/78/76	78	1/0/2	1,0	1,3	2,5

mittlerer Fehler in %: 2,3

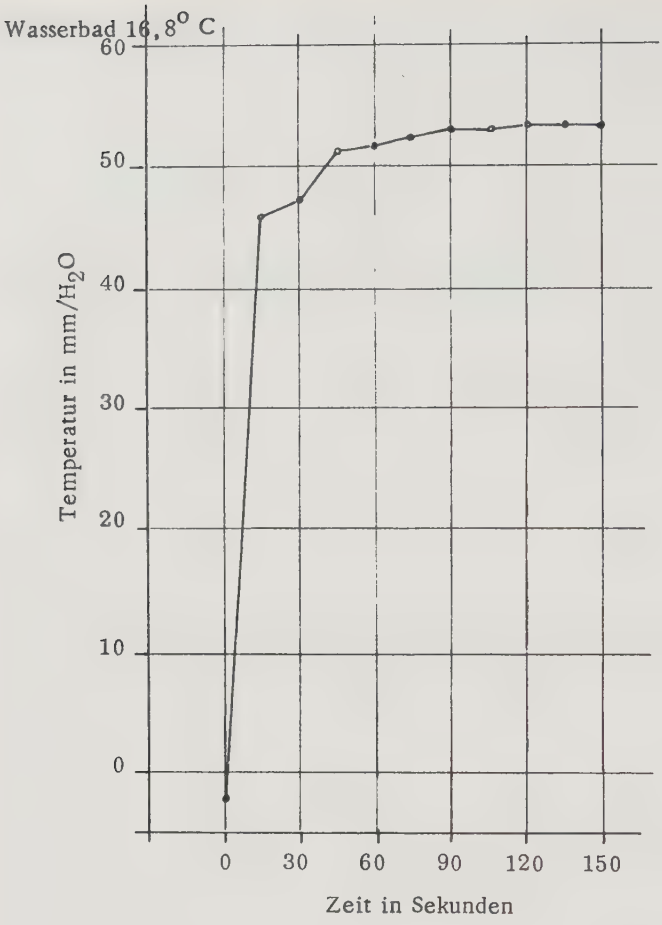


Abb. 2

5. RESULTATE, AUSWERTUNG, DISKUSSION

Zunächst galt es, die von CZIKE [5] und BOTTARI [6] beschriebenen Ergebnisse, nämlich dass nach der Hauptmahlzeit die Wasserdampfausscheidung durch die Lungen erhöht sein soll, zu prüfen. Die Bestimmungen erfolgten unmittelbar vor und nach dem Mittagessen. - Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

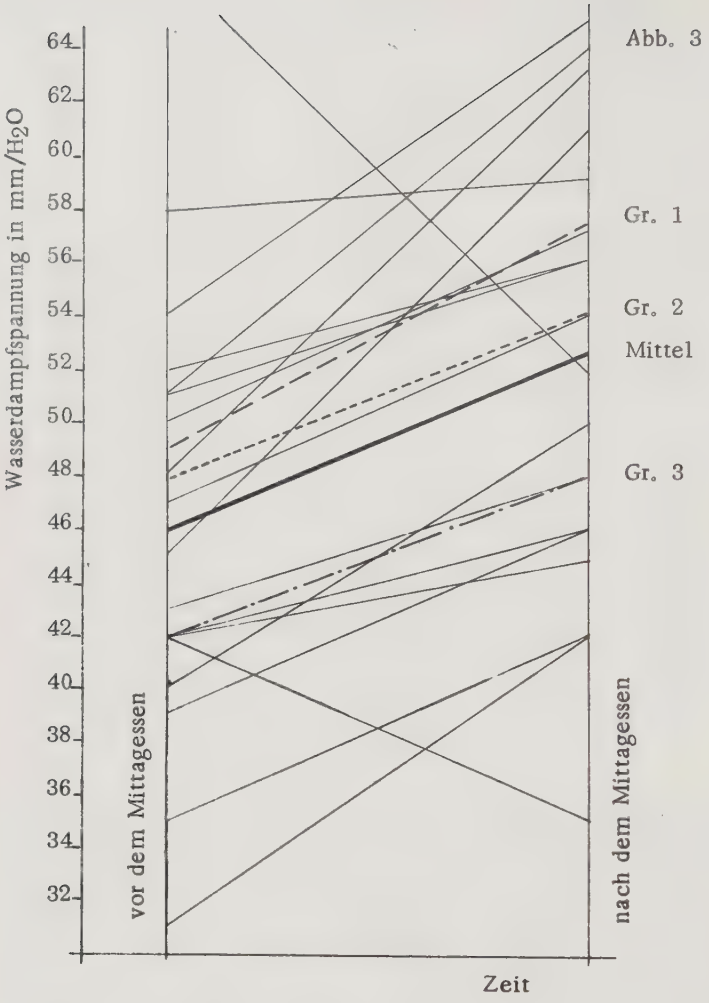
V. P.	Zimmertemp. in °C		Atemtemp. in °C		Wasserdpf. -Sp. in mm/H_2O	
	vor	nach	vor	nach	vor	nach
1. 31 jähr.	22,0	24,0	35,6	35,2	35	42
2. 25 jähr.	22,0	24,0	36,9	36,1	67	57
3. 25 jähr.	20,0	20,0	36,5	36,0	51	64
4. 25 jähr.	20,0	21,0	35,9	35,0	48	63
5. 25 jähr.	22,0	22,0	36,5	36,4	45	61
6. 15 jähr.	22,0	24,0	33,9	34,9	42	45
7. 15 jähr.	10,0	21,0	35,0	35,0	58	59
8. 15 jähr.	19,5	20,0	35,2	34,5	45	61
9. 15 jähr.	19,5	20,0	36,0	35,2	52	56
10. 15 jähr.	20,0	20,0	36,5	35,5	54	65
11. 15 jähr.	19,5	20,0	35,0	34,2	42	35
12. 14 jähr.	19,0	19,0	35,5	35,5	39	46
13. 14 jähr.	22,0	22,0	36,2	36,0	51	56
14. 13 jähr.	22,0	24,0	34,0	35,0	42	46
15. 13 jähr.	20,0	19,5	37,5	37,8	40	50
16. 13 jähr.	21,5	21,5	32,0	32,5	43	48
17. 13 jähr.	22,0	22,0	36,1	35,9	31	42
18. 12 jähr.	21,5	21,5	31,9	32,5	47	54
19. 12 jähr.	22,0	22,0	36,0	35,5	40	50
20. 11 jähr.	20,0	19,5	37,2	37,2	50	57

Errechnet man daraus die Mittelwerte, dann ergibt sich bei einer durchschnittlichen Abnahme der Atemtemperatur von 35,5° C auf 35,3° C (0,2° C) eine mittlere Zunahme der Wasserdampfausscheidung von 14,74 %. Denn die errechnete Zunahme beträgt + 6,7 mm/H_2O, d. h. von 46,1 mm/H_2O vor dem Mittagessen auf 52,8 mm/H_2O unmittelbar nachher. - Siehe auch Abb. 3.

Hierauf wurde eine Abhängigkeit der Wasserdampfausscheidung von der Grösse, dem Gewicht und dem Soll-Umsatz der Versuchsperson gesucht. Mit Sicherheit konnte jedoch in keinem Falle eine solche nachgewiesen werden.

Immerhin ist es gelungen, eine Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes der Ausatmungsluft vom Alter der Versuchsperson festzustellen. Dieser ist umso höher, je höher das durchschnittliche Alter der in Altersgruppen eingeteilten Versuchspersonen beträgt. Die entsprechenden Daten sind in der Abb. 3 und auch in der untenstehenden Zusammenstellung aufgezeichnet.

Die untersuchten Versuchspersonen wurden dazu in 3 Altersgruppen eingeteilt und hierauf die entsprechenden Mittelwerte errechnet:



1. Gruppe: durchschnittliches Alter 26,2 Jahre (5 V. P.)
vor dem Mittagessen: 49,2 mm/H_2O
nach " " : 57,4 "
Zunahme: + 8,2 mm/H_2O (16,6 %)

2. Gruppe: durchschnittliches Alter 14,8 Jahre (8 V. P.)
vor dem Mittagessen: 47,9 mm/H_2O
nach " " : 54,0 "
Zunahme: + 6,1 mm/H_2O (12,7 %)

3. Gruppe: durchschnittliches Alter 12,4 Jahre (7 V. P.)
vor dem Mittagessen: 41,9 mm/H_2O
nach " " : 48,1
Zunahme: + 6,2 mm/H_2O (14,8 %)

Weiter konnte eine deutliche Parallelität zwischen der Temperatur der Ausatmungsluft und ihrem Feuchtigkeitsgehalt gefunden werden. -

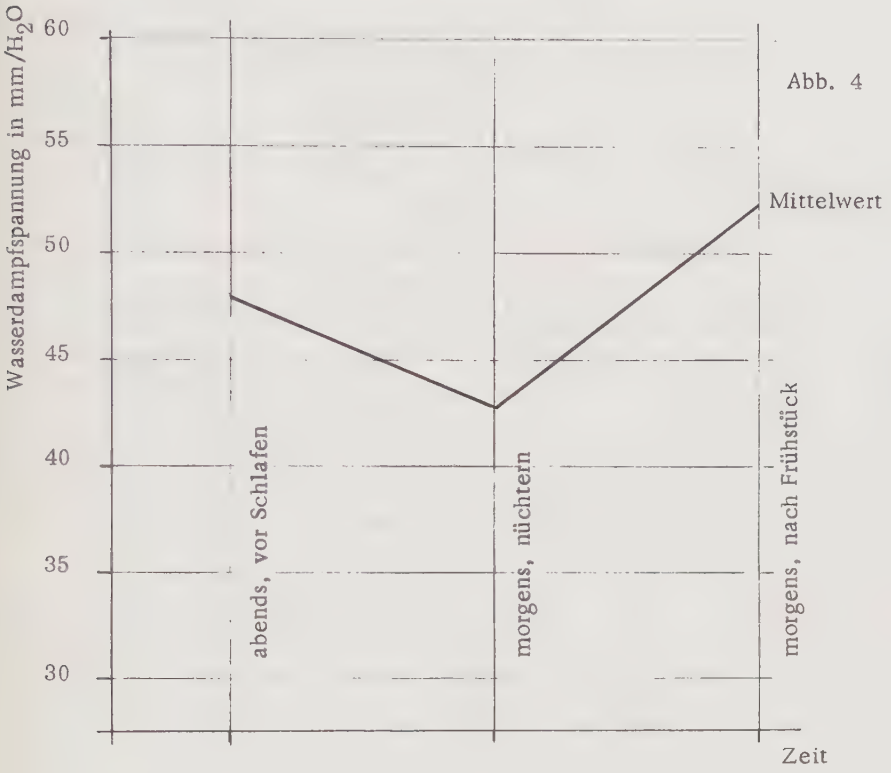


Abb. 4

Bei einer durchschnittlichen Temperatur der Ausatmungsluft von 36,2° C betrug der Wasserdampfgehalt 54 mm/H_2O, bei 35,4° C 49 mm/H_2O und bei 34,6° C noch 45 mm/H_2O (20 Versuchspersonen). Diese Tatsache scheint die Vermutung von CHRISTIE [3] (siehe weiter oben) zu bestätigen, nämlich dass eine Aenderung der Wasserausscheidung durch die Lungen von der Temperatur in diesen selbst abhängen soll.

Eine weitere Versuchsreihe sollte dann die Verhältnisse des Feuchtigkeitsgehaltes der Exspirationsluft abends, morgens nüchtern und morgens nach dem Frühstück

beleuchten. - Dazu wurden abends, vor dem Schlafen, morgens, gleich nach dem Aufwachen und unmittelbar nach dem Frühstück Messungen gemacht. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt und in der Abb. 4 übersichtlich aufgezeichnet. Sie ergaben sich aus Versuchen an 7 Personen. - Diese zeigen deutlich, dass die Wasserausscheidung durch die Lungen nachts, während des Schlafens, leicht zurückgeht (5,7 %), um dann nach dem Frühstück, also nach Wasseraufnahme, wieder um 20 % anzusteigen. - Betrachtet man die Wasserabgabe durch die Lungen als ein im Dienste des Wasserhaushaltes des Organismus stehender Mechanismus, dann kann das einem auch nicht weiter wundern.

Zeit	durchschnittl. Atemtemperatur	durchschnittl. Wasserdampfsp.
abends, vor Schlafen	35,1° C	48 mm/H_2O
morgens, nüchtern	34,1 "	43,5 "
morgens, nach Frühstück	34,1 "	52,2 "

In diesem Sinne sind auch die weiteren Versuche zu interpretieren. - Zunächst wurde einmal die Wasserdampfspannung vor und nach einem Dauerlauf untersucht. Dieser führte über eine Strecke von 3,9 km mit ca. 150 m Höhendifferenz. Die Atemfrequenz war bei den 7 Versuchspersonen nach dem Lauf erhöht, aber regelmässig. Dabei ergaben sich nach dem Versuch um durchschnittlich 5,8 mm/H_2O (49,2 mm/H_2O) niedrigere Werte als vorher (55,0 mm H_2O). Diese Abnahme von 10,54 % illustriert deutlich die Einschränkung der Wasserabgabe im Dienste eines geordneten Haushaltes. Die Ergebnisse sind auch in Abb. 5 dargestellt.

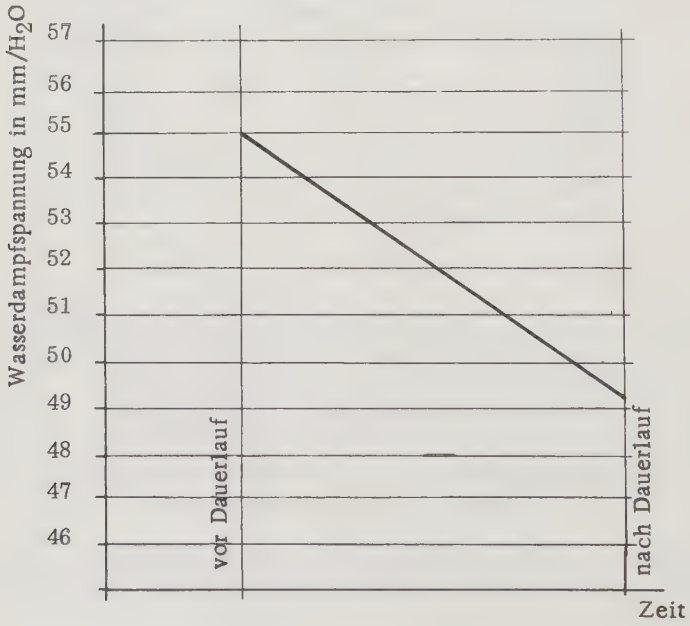


Abb. 5

Natürlich interessiert jetzt auch die Wasserabgabe der Lungen im Durst und nach reichlicher peroraler Flüssigkeitsaufnahme. - Die entsprechenden Messungen wurden über eine längere Versuchsdauer ausgedehnt, um namentlich auch das zeitliche Verhalten der Wasserdampfspannung festzuhalten. Eine erste Bestimmung erfolgte im Durst, die 2., 3., 4. und 5. in Abständen von je 10 Minuten, die 6. erst 90 Minuten nachdem die Versuchsperson 1/2 Liter Wasser getrunken hatte. - Ein Beispiel aus dem Protokoll mag das Beschriebene erläutern:

V. P.	Tag	Zimmer-temp. in °C		Atemtemp. in °C		Wasserdampfspannung in mm/H_2O	
		vor	nach	vor	nach	vor	nach 10': 52
P. St. 13 j.	13. 8. 1953	21,5	22,0	35,9	35,2	39	nach 20': 48 nach 30': 42 nach 40': 35 nach 90': 36

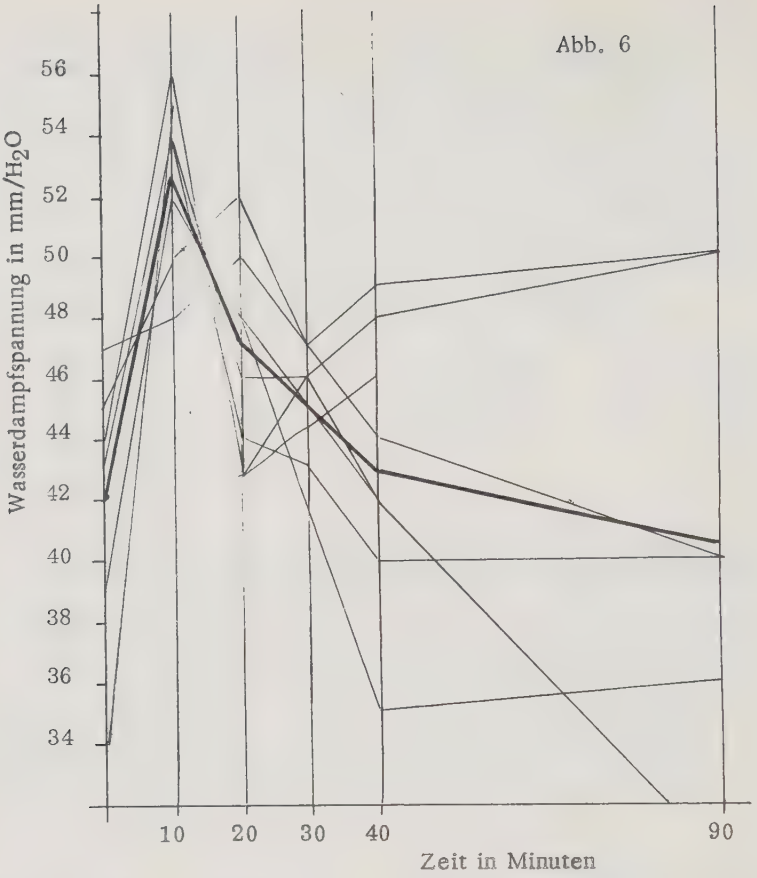
Die Zusammenstellung der Versuchsresultate ergab folgende Mittelwerte:

Mittelwert bei Durst		42,0 mm/H_2O
"	10' nach 1/2 Liter Wasser	52,3 "
"	20' " " " "	47,2 "
"	30' " " " "	45,2 "
"	40' " " " "	43,2 "
"	90' " " " "	40,7 "

Daraus liess sich errechnen:

Mittl.	Zunahme	gegen	Durst	nach	10':	10,3 mm/H_2O
"	"	"	"	"	20':	5,2 "
"	"	"	"	"	30':	3,2 "
"	"	"	"	"	40':	1,2 "
"	Abnahme	"	"	"	90':	-1,3 "

Interessant ist die Feststellung, dass bereits 10 Minuten nach der peroralen Flüssigkeitsaufnahme die Wasserausscheidung durch die Lungen ihr Maximum erreicht hat, um dann allmählich, im Verlauf von 90 Minuten wieder abzusinken. - Aus den gegebenen Werten ist abzulesen, dass bereits nach einer Stunde wieder der Zustand erreicht ist, der weiter oben als Durst bezeichnet wurde und der dadurch Ausgangspunkt der Versuchsreihe geworden war. Diese Feststellung findet ihre Erklärung in der Tatsache, dass während der Zeit der Bestimmungen eine drückende Hitze herrschte (10. 7. -17. 7. 53), so dass sich so schnell wieder Durst melden konnte.



Der schon mehrmals zitierte CZIKE [5] will auf Grund seiner Untersuchungen nach peroraler Wasseraufnahme bei gesunden Nieren keinen Einfluss auf die Feuchtigkeitsabgabe durch die Lungen festgestellt haben. Meine Ergebnisse, die übrigens in Abb. 6 übersichtlich dargestellt sind, stehen zu dieser Feststellung in krassem Widerspruch. Wenn ich auch, wie in der Beschreibung der Testversuche erwähnt wurde, bei meinen Resultaten einen Fehler von 2,3 % in Kauf nehmen muss, dann kann eine Zunahme der Wasserausscheidung nach dem Trinken von nur 1/2 Liter Wasser, gegenüber dem Durst, von 24,5 % als ganz sichere Erhöhung des Feuchtigkeitsgehaltes der Ausatmungsluft angenommen werden.

Endlich wurde auch der fiebernde Organismus auf den Wasserdampfgehalt in der Ausatmungsluft untersucht. Das Fieber wurde experimentell erzeugt, und zwar indem die Körpertemperatur der Versuchsperson im heissen Wasserbad (39-40° C) erhöht wurde. Die bereits von CZIKE [5] beschriebene Erhöhung des Feuchtigkeitsgehaltes der expirierten Luft konnte auch hier deutlich festgestellt werden. Die folgende Zusammenstellung mag das Gesagte belegen:

Körpertemperatur oral gemessen	Wasserdampfgehalt der ausgeatmeten Luft
38,6 °C	58 mm/H_2O
37,7 "	63 "
37,6 "	60 "
37,4 "	57 "
37,3 "	51 "
37,1 "	49 "
37,1 "	45 "

Die Erklärung für den Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes der Ausatmungsluft im warmen Bad muss wohl darin gesucht werden, dass die Wärmeabgabe durch die Haut verhindert ist, wobei die Lunge nahezu einziges Abkühlungsorgan geworden ist. - Eine Parallelität zwischen der Körpertemperatur und der Temperatur der Atmungsluft wurde gesucht, konnte aber nicht nachgewiesen werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG

1. Die vorgelegte Methode ist für die vergleichende Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Ausatmungsluft geeignet. Sie arbeitet mit einem Fehler von 2,3 %.
   Prinzip: Ein bestimmtes Volumen Exspirationsluft erleidet in einer Glasbirne durch Entzug des Wassers mit konz. Schwefelsäure einen Volumenverlust, der mit einem angeschalteten Manometer gemessen werden kann.

2. Nach reichlicher Flüssigkeitsaufnahme kann eine vermehrte Wasserausscheidung durch die Lungen nachgewiesen werden und zwar hat sie ihr Maximum bereits 10 Minuten nach dem Trinken erreicht (steiler Anstieg des Diagramms bis zum Maximum, dann allmähliches Absinken während ca. 90 Minuten). - Ebenso ist der Feuchtigkeitsgehalt der Atemluft erhöht nach dem Essen, bei Fieber und im warmen Bad; erniedrigt im Durst, morgens nüchtern und nach einer sportlichen Leistung. - Auch Veränderungen des Lungenzustandes bedingen Veränderungen des Feuchtigkeitsgehaltes.

3. Eine Abhängigkeit der Wasserdampfspannung kann mit Sicherheit von der Temperatur der Ausatmungsluft und vom Alter der Versuchsperson nachgewiesen werden; Soll-Umsatz, Grösse und Gewicht der Versuchsperson scheinen keinen Einfluss auf die Wasserausscheidung durch die Lungen zu haben.

4. Wir schliessen, dass die Wasserabgabe durch die Atmungsluft im Sinne eines geordneten Wasserhaushaltes des Organismus geregelt ist und dass sie sich folglich unter verschiedenen Bedingungen ändern muss.

5. Die Wasserabgabe in den Atmungswegen ist nicht konstant und richtet sich nach dem Zustand des Wasserhaushaltes des Körpers.

LITERATURANHANG

1. JACQUOT und MAYER: Polypnée thermique et teneur en eau de l'air expiré. Cpt. rend. des séances de la soc. de biol. Bd. 93, Nr. 37, 1471-1474 (1925)

2. VIALE: Variazioni del quoziente respiratorio e dell'acqua espirata in funzione della profondità del respiro. Arch. di fisiol. Bd. 23, H4, 526-571 (1925)

3. CHRISTIE: The pressure of aqueous vapour in the alveolar air. J. of Physiol. 77, 35-48 (1932)

4. JACQUOT und MAYER: Polypnée thermique et teneur en eau de l'air expiré. Ann. de physiol. et de physiochim. biol. Bd. 2, Nr. 2, 153-171 (1926)

5. CZIKE: Wasserausscheidung durch die Atmung. Z. exper. Med. 78, 803-825 (1931)

6. BOTTARI: L'acqua espirata in soggetti sani (Tecnica e primi risultati). Ann. Ist. Forlanini 1, Nr. 10, 89-98 (1937)

7. SCHMITT-NIELSEN: Pulmonary water loss in desert rodents. Amer. J. Physiol. 162, 31-36 (1950)

8. MADON-ROWINSKI: L'eliminazione dell'acqua per i polmoni e per la cute nei lattanti. Nota prelim. Minerva Med. (Torino) II, 271-273 (1930)

9. CZIKE: Wasserausscheidung durch die Atmung. II. Mitteilung. Z. exper. Med. 86, 772-777 (1933)

10. PERWITSCHKY: Die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse der Atemluft in den Luftwegen. Arch. f. Ohren-, Nasen- und Kehlkopfheilkunde Bd. 117, H1, 1-36 (1927)

11. LEVI: Sur l'élimination de la vapeur d'eau par les poumons, en rapport à la tension de vapeur dans l'air inspiré. Arch. ital. de biol. Bd. 74, H3, 229-232 (1925)

12. GALEOTTI: Bioch. Zeitschr. 1912.

13. SWINDLE: Mechanical factors contributing to the exanche of fluids in the body. II. In the lungs of the mammal. Amer. J. Physiol. 93, 600-606 (1930)

14. FENICIA: Sulla sezione dell'albero, ove si produce l'evaporazione di acqua pulmonare.
Riv. Pat. sper. II. s. 6, 424-436 (1936)

15. MAGNE: Soc. Biol. 75, 679 (1913)

16. LILJESTRAND und SAHLSTEDT: Temperatur und Feuchtigkeit der ausgeatmeten Luft.
Arch. f. Physiol. Bd. 46, H1/2, 94-120 (1924)

17. SCHOEDEL-WOLF: Alveolarluft
Erg. Physiol. 39, 450-488 (1937)

18. JONES: Determination of relative humidity while measuring respiration in a gas train system.
Science (N. Y.) I, 202 (1940)

19. ASCHOFF, JUERGEN, MUNDT, SCHOEDEL, SCHWARZ: Fortlaufende Bestimmung der Konzentration von Wasserstoff in der Ausatmungsluft mit Hilfe von Hitzdrahtdüsen.
Pflügers Arch. 244, 87-98 (1940)

20. ABDERHALDEN: Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden.
Abt. IV, Teil 9, 246-249 (Berlin und Wien 1925)

21. ZUNTZ, LOEWY, MUELLER, CASPARI: Höhenklima und Bergwanderungen.
S. 95, 96, 103

22. LOEWY und GERHARTZ: Pflügers Arch. 155, 231 (1913)

23. ROLLY: Zeitschr. f. d. ges. exp. Med. 1250, 155 (1921)

24. BENEDICT-TALBOT: The gaseves Metabolisme of infants (1914)